

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця

«Допущено до захисту»

Оцінка «_____»

Зав. кафедри теоретичної фізики

Голова ЕК _____

імені академіка І. М. Ліфшиця

доц. Рашба Г. І. _____

_____ 2024 р.

_____ 2024 р.

БИРЬКА Владлен Анатолійович

**Аналіз температурних залежностей міцнісних властивостей металевих
сплавів застосовуваних в двигунах внутрішнього згорання.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр»

за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»

Освітньо-професійна програма «фізика та астрономія в закладах освіти»

Науковий керівник - доцент кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця, кандидат фізико-математичних наук

Наталія АКСЬОНОВА

Харків 2024

Анотація

Бирька В.А. Аналіз температурних залежностей міцнісних властивостей металевих сплавів застосовуваних в двигунах внутрішнього згоряння. – Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія», освітньо-професійна програма «фізика та астрономія в закладах освіти». – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2024. – 29 с. – Табл. 2.

В роботі проводиться аналіз проблеми пошуку нових технологій створення матеріалів із завданими властивостями та подальшого використання їх в якості основи для безрозбірної ремонтно – відновлювальної технології. Досліджено механічні та структурні властивості металів і сплавів, що можуть бути застосовані в роботі двигунів внутрішнього згоряння. Основними об'єктами досліджень є сучасні матеріали, на базі яких пропонується створення препаратів для обробки деталей, а також тверді змащення на основі фулериту.

Результати роботи дозволяють продемонструвати теоретичні, під час аналізу матеріалів з покращеними властивостями, практичні, при обранні методу відновлення та ремонту, а також методичні пропозиції для проведення експериментальної роботи.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, міцність, ремонтно-відновлювальні технології, структурні властивості.

Abstract

Birka V.A. Analysis of temperature dependences of the strength properties of metal alloys used in internal combustion engines – Manuscript.

Diploma work for Master degree, specialty 104 – «physics and astronomy», – Kharkiv: Kharkiv National University named after V.N. Karazin, 2024. – p. 29, Tab. 13.

The work analyzes the problem of finding new technologies for the creation of materials with given properties and their further use as a basis for a comprehensive repair and restoration technology. The mechanical and structural properties of metals and alloys that can be used in the operation of internal combustion engines have been studied. The main objects of research are modern materials, on the basis of which it is proposed to create preparations for processing parts, as well as solid lubricants based on fullerite.

The results of the work make it possible to demonstrate theoretical, during the analysis of materials with improved properties, practical, when choosing a method of recovery and repair, as well as methodological suggestions for conducting experimental work.

Keywords: internal combustion engines strength, repair and restoration technologies, structural properties.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДВЗ І ЇХ ВЛАСТИВОСТІ	8
1.1 АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ДЛЯ ДВЗ	8
1.2 МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ФУЛЕРИТУ.....	10
РОЗДІЛ 2. РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮЮЧИ ТЕХНОЛОГІЇ.....	15
2.1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ	15
2.2 МОДЕЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ З ЗАВДАНИМИ ВЛАСТИВОСТІМИ	15
РОЗДІЛ 3.МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ РОБОТИ	23
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	26

ВСТУП

У роботі розглядається сучасна проблема пошуку нових технологій створення матеріалів із заданими покращеними властивостями та подальшого використання їх як основа для безрозбірної ремонтно-відновлювальної технології.

Протягом кількох десятиків років мотори виготовлялися виключно із сталі, алюмінію, чавуну та інших сплавів. Тренд, що зберігався, на зменшення габаритів і маси, з одночасним збільшенням потужності, привів до того, що двигуни все частіше роблять із застосуванням пластику. Але в серійному виробництві автомобілів найпопулярнішим залишався чавун [1].

При довгій повноцінній експлуатації з врахуванням складності конструкції та властивостей матеріалів трапляються знос та певні дефекти [2]. Необхідність відновлення, ремонту або заміни іншими матеріалами з покращеними механічними властивостями викликає великий інтерес.

Відновленню працездатності вузлів тертя машин і механізмів за допомогою ремонтно-відновлювальних (РВ) складів та обґрунтування фізичних процесів, що протікають при цих методах, приділяється велика увага, зважаючи на їх доцільність. Витрати ремонт машин і механізмів у промисловості розвинених країн досягають 4-5 % національного доходу [3].

У процесі багаторічних досліджень та апробування РВ-технологій стосовно підшипників кочення встановлено, що обробки підшипників ремонтно-відновними складами доцільні на всіх стадіях життєвого циклу машин та агрегатів. При цьому усуваються шуми та вібрації, збільшується міжремонтний період, забезпечується енерго-ресурсозберігаюча експлуатація машин та агрегатів, досягається суттєва економія витрат на ремонт та експлуатацію.

Міцнісні властивості металів, які прийнято використовувати при експлуатації технічних засобів, відносяться до найважливіших фізичних характеристик матеріалів, котрі мають велике прикладне значення, а тому

викликають значний науковий інтерес [4-6]. Високі температури, тертя, механічні деформації є нормальними умовами роботи двигунів внутрішнього згоряння, тому аналіз температурних залежностей міцнісних властивостей металевих сплавів застосовуваних в двигунах має велике значення. Процеси зносу та старіння особливих, а як наслідок, і дорогих деталей та комплексів, неминучий. При певних складнощах заміни таких деталей виникають вимоги альтернативних підходів до рішення проблеми.

В роботі планується провести аналіз можливих варіантів ремонтно-відновлювальних технологій та методів створення матеріалів для виготовлення деталей технічних засобів з покращеними міцнісними характеристиками. Власне, такі варіанти і можуть вважатись альтернативою для складного дорого, а інколи і неможливого ремонту унікальних елементів технічних засобів, механізмів та їх складових елементів.

Метою дипломної роботи є аналіз та пошук нових технологій створення матеріалів із заданими покращеними механічними властивостями та подальшого використання їх як основи для безрозбірної ремонтно-відновлювальної технології.

Нами були поставлені такі *завдання дослідження*:

- провести аналітичні дослідження та систематизувати інформацію про матеріали (метали, сплави, конструкційні та полімерні сполуки), що використовуються в сучасному двигунобудуванні;
- розглянути особливості видів стандартних та альтернативних методів ремонтно-відновлюваних технологій для елементів конструкцій механізмів;
- якісно та кількісно оцінити складові, які можуть бути використані для створення нових матеріалів із заданими покращеними механічними властивостями;

- сформувати тематичні моделі та методика для використання опрацьованих досліджень в вигляді експериментальної (лабораторної) роботи.

Об'єктом дослідження є нові матеріали, на основі котрих створюються препарати для обробки деталей, тверді змащення, що базуються на вуглецевих кластерах (фулеритах).

Предметом є міцнісні, тріботехнічні та структурні властивості складових для створення матеріалів з покращеними властивостями та методи ремонтно-відновлюваних технологій на їх основі.

Практична цінність результатів, отриманих у даній роботі, полягає у тому, що проаналізовані, систематизовані та змодельовані методики безрозбірних ремонтно-відновлюваних технологій на базі матеріалів з завданими властивостями. А також запропоновані методичні рекомендації для проведення експериментальної роботи.

Достовірність наведених у роботі результатів підтверджується тим, що були використані відомі методи аналізу та діагностики фізичних процесів, таких як знос, тертя, міцність елементів механізму двигуна внутрішнього згоряння.

РОЗДІЛ 1. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДВЗ І ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

1.1 Аналіз властивостей металів і сплавів для ДВЗ

При виробництві автомобільних двигунів внутрішнього згорання вже ціле століття зберігає лідерство чавун. Даний матеріал має низку переваг перед аналогічними сплавами, крім невеликої вартості. Достоїнствами чавуну в автомобілебудуванні вважаються [1, 2]:

- висока технологічність виготовлення деталей, можливість механічної обробки;
- термостійкість та зносостійкість вища, ніж у інших сплавів;
- жорсткість матеріалу та одночасно демпфуючі характеристики забезпечують надійність двигуна;
- можливість встановлювати елементи кріплення відразу в блок двигуна;
- простий і доступний ремонт, паяння поверхонь.

Крім того, двигуни з чавуну мають вартість нижчу за аналогічні моделі з алюмінію. Але існують у даного матеріалу свої недоліки. Головний мінус чавунного двигуна – його величезна маса.

Сучасні двигуни внутрішнього згорання виготовляють найчастіше з інноваційного сплаву – білого чавуну. Виробляється це за допомогою лазерного відбілювання: сірий чавун переплавляють у тонкий шар білого. При цьому зазвичай двигуни з білого чавуну при пошкодженні верхнього шару силового агрегату складно ремонтувати через високу твердість металу. Білий чавун покриває частину поверхні силового агрегату і наноситься зазвичай на сірий чавун, який є основним матеріалом.

Зазвичай у двигунах внутрішнього згорання алюміній виконує другорядну роль і не є основним матеріалом. Повністю силовий агрегат виготовляють тільки із кремнієво-алюмінієвих сплавів [5]. Такі двигуни коштують дорого, але мають значно меншу масу за підвищеної потужності. Вони використовуються в гібридах, також із нього створюють двигуни для

болідів Формули-1 (F1). У звичайних двигунах алюміній може використовуватись у таких деталях:

- гільза, вставного чи залитого типу;
- шпильки для запобігання зривам різьблення;
- кришки підшипників;
- поршні, кришка, блок та інші елементи двигуна.

Масово-алюмінієві двигуни використовували саме для гоночних автомобілів, тому і сьогодні застосування спрямоване саме на спортивні машини. Алюміній м'який та легкий матеріал, тому він допомагає значно знизити масу та габарити двигуна.

Двигуни з алюмінієво-кремнієвих сплавів виготовляли багато відомих виробників. Такі силові агрегати покривалися нікелевим покриттям, що дозволяє збільшити ККД двигуна в рази. Автомобілі з алюмінієвими двигунами не отримали популярності, через швидке хімічне руйнування [1].

Деякі сорти палива з високим вмістом сірки здатні зруйнувати шатун або спалити поршень. Багато двигунів з алюмінію швидко зношувалися. Саме у зв'язку з цими недоліками, популярність алюмінієві мотори не здобули.

Крім алюмінію, сірого та білого чавуну, а також алюмінію, при виробництві двигунів внутрішнього згоряння використовуються також інші метали, наприклад, сталеві і магнієві сплави [4]. Застосування інноваційних матеріалів є актуальним в основному для використання в швидкісних автомобілях, де важливо зберігаючи потужність двигуна знизити загальну масу транспортного засобу. У такому разі автовиробник може використовувати легкі сплави не тільки в ролі другорядного матеріалу, але й чавуну.

Магнієві сплави мають масу менше алюмінію, тому вони більш цілеспрямовано можуть застосовуватися для зниження ваги авто. Недолік такого матеріалу – велика вартість металу порівняно з аналогічними

металами. Не дивлячись на цей мінус двигуни з магнієвих сплавів застосовують в авіації, бензопилах. [4].

Блок двигуна, виконаний з магнієвого сплаву або іншого кольорового металу, виглядає естетично і привабливішим, ніж агрегати з чавуну. При цьому з метою збереження потужності та збільшення ККД, зазвичай вони мають таку ж конструкцію, але меншу масу, порівняно з аналогами з більш важких металів [1, 2]. Також існують моделі із двигунами з міді [2].

1.2 Матеріали на основі фулериту

Створення технологічних засобів нового покоління ставить перед дослідниками багатoproфільні задачі, серед яких одержання нових матеріалів із заданими властивостями грає одну з найважливіших ролей.

Одним з перспективних напрямків є широке застосування матеріалів на основі фуллерита та графену [6, 7] в новітніх технологіях, що передбачають зниження зносу матеріалів при терті, а також складування і збереження різних хімічних елементів, (у тому числі важких), які є продуктами відходів, виробництва електричних батарей, елементів живлення і водневого палива.

Останнім часом найбільш актуальними роботами в цьому напрямку є дослідження, пов'язані з вивченням фізичних властивостей нового класу органічних молекулярних кристалів – фуллеритів, що складаються з гігантських високосиметрійних вуглецевих кластерів. Існує ціла безліч фуллеренів, з огляду на сімейство C_n ($n < 60$ – малі фуллерени, C_{60} , C_{70} , $n > 70$ – гіперфуллерени) і їх сполук. Найбільш типовим представником такого класу матеріалів є фуллерен C_{60} . В загальній уяві, фуллерени, є третьою, відмінною від алмазу і графіту, формою вуглецю. За відкриття й одержання фуллерита C_{60} американські вчені Крото, Смоллі і Керл у 1996 році отримали Нобелівську премію з хімії [8].

Молекула фуллерена C_{60} являє собою усічений ікосаедр, що володіє майже сферичною симетрією. Величина діаметра молекули складає $\sim 10 \text{ \AA}$

(Ангстрем), тобто молекула величезна. Висока симетрія молекул знаходить свої відображення в наборі унікальних фізичних властивостей. Твердий стан зв'язаних молекул фуллерена називають фуллеритом, а леговані металевими атомами фуллерити – фуллеридами [8]. Фуллерен C_{60} являє собою типовий молекулярний кристал. Загальні властивості C_{60} представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 Основні характеристики молекули фуллерена і фізичні властивості чистого C_{60} [9].

Щільність	$1.72 \times 10^{-10} \text{ г/см}^3$
Модуль пружності	14 ГПа
Об'ємний коефіцієнт теплового розширення	$6.0 \times 10^{-5} \text{ 1/ К}$
Швидкість звуку V_l (повздовжня)	$2.6 \times 10^3 \text{ м / с}$
Швидкість звуку V_t (поперечна)	$1.2 \times 10^3 \text{ м / с}$

Особливі властивості фуллеренів у кристалічному стані вказують як на багатий фізичний зміст явищ, що відбуваються при участі фуллеренів, так і на значні перспективи використання цих матеріалів у різних галузях транспортного машинобудування.

В результаті допіювання фуллерену C_{60} лужними металами, фуллерид, що утвориться при визначеній стехіометрії (MeC_{60}) є органічним надпровідником із критичними температурами $T_c \approx 40 \text{ К}$ [10]. Зазначений матеріал одержують у результаті обробки плівок або полікристалічних зразків C_{60} парами металу при температурі в декілька сотен градусів Цельсія. На базі такого матеріалу виготовляють електро-магнітні соленоїди великої

потужності, які можуть знайти застосування в багатьох технічних засобах транспорту.

Перетворення кристалічного фулерену в алмаз відбувається при значно більш м'яких умовах, чим у випадку традиційно використовуваного для цієї мети графіту. Тиск, необхідний для перетворення твердого фуллерита в алмаз, знижується з ростом температури [11]. Вдалими виявилися експерименти з синтезу аморфного алмаза при ударному стисканні кристалічного фулерена C_{60} . Важливо, що це досягається без будь-якого додаткового нагрівання зразка. Така технологічна можливість дає змогу використовувати штучні алмази в якості необхідних часток для вимірювальних інструментів та приладів.

Уже перші експерименти з дослідження механічних властивостей фуллерита підтвердили надії дослідників на створення високоефективного твердого змащення на основі фуллеренів. Згідно робіт [11, 12], поверхня твердих матеріалів, покритих фуллереновою плівкою, має аномально низький коефіцієнт тертя, підвищену довговічність та зносостійкість. Якщо технологія виробництва такого твердого мастила буде налагоджена, та буде забезпечуватися можливість його практичного використання, зносостійкість деталей та механічний ККД технічних засобів суттєво зростуть.

Крім того, заслуговує уваги і те, що за результатами проведених експериментів на апаратах високого тиску, у яких пластичний фуллерит стискувався до 300 тис. атм. і піддавався деформації зсуву, за кілька хвилин у камері утворювалися мікрокристалічні нові надтверді речовини, що залишають подряпини на поверхні алмазного ковадла [11]. Це визначає перспективи його використання при створенні сучасних ріжучих інструментів.

В цьому плані групою авторів [12] було проведено комплексне дослідження структури і мікропластичності чистого фуллерита C_{60} , вивчені геометрія ковзання і температурні залежності мікротвердості H_V (за

Віккерсом) у широкому інтервалі температур. Слабкі Ван-дер-Ваальсові взаємодії між молекулами визначають низькі величини мікротвердості H_V і границі текучості σ_T кристалу C_{60} . При кімнатній температурі типове значення $H_V = 0.2$ ГПа, а відношення $H_V / \sigma_T \cong 20$ [12].

Слід зауважити, що надтверді матеріали та матеріали з підвищеною міцністю для відповідальних деталей транспортних технічних засобів можуть бути створені на основі сполук фуллериту. При високих тисках і температурах у масивних зразках, при звичайному тиску під впливом світлового опромінення у видимій і ультрафіолетовій області спектра в тонких плівках фуллериту, а також у легованих лужними металами ($A = K, Rb, Cs$) фуллеритах AC_{60} [13], спостерігалася полімеризація молекул C_{60} . Відомо [14], що полімеризація приводить до зміцнення, а полімерні фази є особливо міцними.

При частковому термічному руйнуванні шарів графіту можуть утворюватися не тільки молекули фуллерену, що мають замкнену сферичну структуру, але також довгі трубки, так звані нанотрубки, маючих довжину в декілька нанометрів, поверхня яких виконана правильними шестикутниками [15]. Тобто, нанотрубки мають унікальні механічні властивості, надвисоку міцність.

В роботі [13] наведено, що домішки “упровадження” (атоми Ag , молекули O_2) суттєво впливають на властивості фуллеритів, приводять до зміцнення даного матеріалу. У залежності від типу домішок і характеру їхньої взаємодії з молекулами кристалічного оточення фуллерити з домішками мають властивості, що не відповідають ні чистому фуллериту, ні речовині домішки. Показано, що найбільш сильне зміцнення відбувалося при витримці кристалів в атмосфері аргону або кисню в результаті впровадження атомів Ag чи молекул O_2 в порожнечі ґрат C_{60} [12].

Згідно з роботою [9], фуллерен також може використовуватися як основа для виробництва акумуляторних батарей. Ці батареї, принцип дії яких заснований на реакції приєднання водню, у багатьох відношеннях аналогічні широко розповсюдженим металеві-гібридним нікелевим акумуляторам, однак мають, на відміну від останніх, здатність запасати приблизно в п'ять разів більшу кількість водню. Крім того, батареї характеризуються більш високою ефективністю, малою вагою, а також екологічною і санітарною безпекою в порівнянні з найбільш сучасними акумуляторами на основі літію. Такі високоефективні батареї можуть бути застосовані в електронній техніці, яка використовується в інформаційно-керуючих системах на транспорті.

Особливу актуальність використання фуллерену для створення матеріалів, які можуть використовуватися для виготовлення «контейнерів», в яких складаються та транспортуються радіоактивні та високо токсичні відходи. Це можливо завдяки гігантським розмірам самої молекули C_{60} [11] і властивостями захвату її оболонкою інших, навіть важких елементів з тривалим зберіганням.

Наведене вище свідчить, що нові матеріали створені на основі фуллерену та його сполуки відрізняються від традиційних більш високим рівнем механічних характеристик. Це обґрунтовує доцільність проведення науково-дослідних робіт по їх промислового одержання, та використання для виготовлення деталей, елементів констукцій транспортних технічних засобів.

РОЗДІЛ 2. РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮЮЧИ ТЕХНОЛОГІЇ

2.1 Аналіз технологій

Наростаюча потреба у технічних засобах нового покоління ставить перед дослідниками багатопланові завдання.

Найбільший інтерес викликають розробка та оперативне використання в техніці різних енерго- та ресурсозберігаючих технологій [16], застосування яких у традиційній постановці передбачає: раціональне використання енергетичних ресурсів, покращення міцнісних та триботехнічних характеристик з метою підвищення економічності та якості деталей та механізмів різноманітних технічних засобів. В особливе завдання виділяється забезпечення можливості безрозбірного ремонтно-відновлювального оброблення робочих поверхонь деталей машин.

Одним з основних напрямків таких досліджень є одержання нових матеріалів із заданими, запрограмованими властивостями для виготовлення деталей машин та механізмів або їх обробки з метою покращення, а також за необхідності та відновлення механічних характеристик.

2.2 Моделювання матеріалів з заданими властивостями

Інтенсивний розвиток набуває отримання матеріалів, для безпосередньої обробки поверхонь деталей механізмів з очікуваним ефектом у вигляді зниження тертя та зношування в їх кінематичних парах. Причому нові матеріали, на основі яких створюються препарати для обробки деталей, різні – від дрібнодисперсних багатокомпонентних сумішей мінералів з різними добавками (наприклад, дисульфід молібдену MoS_2 , тефлон) до твердих мастил на основі фулеритів – вуглецевих кластерів [17].

Залежно від складу різні принципи дії препаратів. У цьому можна назвати дві групи.

Перші є антифрикційними присадками, що обробляють поверхню практично ідеально (до «дзеркальності»), помітно знижуючи тертя та зношування. До таких речовин відносяться "Motorol" від фірми Liqui Moly (у складі містить дисульфід молібдену MoS₂) і "PTFE" від Hi Gear Product (містить політетрафторетилен - тефлон) [6]. Основні вимоги до робочих поверхонь після обробки – достатня твердість, міцність, пластичність, хороша теплопровідність, стійкість проти корозії та малий коефіцієнт тертя. Для забезпечення цих властивостей структура антифрикційних матеріалів має бути гетерогенною, що складається з пластичної основи та включень твердіших частинок.

Інша група препаратів є реметалізантами, що виробляють вибіркоче нарощування поверхневого шару в найбільш зношених деформованих місцях механізму. Як рекристалізанти можуть використовуватися речовини різних агрегатних станів (рідкі, порошкоподібні, аморфні - гелеві), що містять основу для утворення керамічних матеріалів [6].

Відомо, що кераміка – це неорганічний матеріал, який отримується з відформованих мінеральних мас у процесі обробки високою температурою. Кристалічна фаза кераміки є певною хімічною сполукою і визначає високі значення механічної міцності та термостійкості [6]. Такими препаратами є «Metalyz» (містить мідь – свинець – срібло), RuMET (містить мідь – олово – срібло), а також PBC (ХАДО) та «ТРИБО» (виробляють нарощування металокерамічного шару) [4-6].

При моделюванні важливо врахувати такі вимоги до речовин, що вводяться в механізм:

- повинні бути сумісні з різними видами машинних олій та мастил;
- не повинні вступати у хімічні реакції з маслами;
- не змінювали б в'язкість змащувальних рідин.

Незважаючи на інтенсивний розвиток досліджень у цьому напрямку, вони переважно носять експериментальний характер і не супроводжуються аналітичним описом процесів, що відбуваються. Це визначає необхідність розробки методології математичного прогнозування процесів освіти та розвитку «поверхневого шару», оцінки його механічних властивостей. Один із підходів до вирішення виділеної задачі при використанні препаратів другої групи розглянуто нижче.

Відомо, що робота механізмів машин супроводжується процесами тертя в кінетичних парах – контактних поверхнях, як правило, «метал – метал». У процесі тертя на робочих поверхнях деталей, що труться, виникають високі (аж до передплавильних) температури і великі деформаційні напруги.

В узагальненому поданні, після попадання додаткової речовини в області локального контакту поверхонь, що труться, у верхньому шарі металу відбуваються структурні перетворення. Частинки мастила, як домішки заміщення, проникають у кристалічну решітку металу [9, 10]. Результатом такої взаємодії є утворення шару металокераміки. Такий поверхневий шар певного складу, по суті, не є покриттям, а є новою структурою, що складається з частинок металу з властивими їй новими властивостями.

У зв'язку з викладеним можна запропонувати схему математичного опису процесу формування такого поверхневого шару із заданими поліпшеними властивостями.

Основними етапами є:

1. Визначення складу (хімічної формули) та встановлення температури плавлення металу (або сплаву), з якого виконані деталі механізму, за допомогою проведення фазового структурного аналізу, використовуючи твердотільні та кристалографічні методики дослідження [9, 12].

2. Визначення хімічного складу та фізичних властивостей основних елементів речовини – добавки проводиться на основі застосування фізичних методів аналізу (наприклад, спектральний) [12]. У разі наявності паспортних даних матеріалу деталей та речовини-добавки проведення даних досліджень не є необхідним. За наявності таких відомостей можна скористатися відповідними даними виробників.

3. Виявлення принципової можливості утворення твердих розчинів взаємодіючих речовин (метал + мастило) оцінюється теоретично, з використанням довідкових даних матеріало- та металознавства [1, 2]. Визначення складу формуються в поверхневому шарі таких твердих розчинів та їх кристалічних структур, що відрізняються від структур вихідних взаємодіючих речовин, що являють собою фактично шар нової речовини, проводиться методом фазового аналізу, безпосередньо застосовуючи довідкові дані про фазові діаграми та фазові перетворення (представлені, наприклад, [6, 8, 9]).

Взаємозв'язок між складом, будовою та властивостями речовин є основою для вирішення будь-яких завдань, пов'язаних із вивченням нових матеріалів. Дослідження реальної структури твердих тіл показали принципову можливість отримання кристалічних та некристалічних матеріалів з міцністю, що наближається до теоретичної, що визначається міцністю міжатомних зв'язків. Отже, наступним пунктом в описі процесу формування поверхневого шару нової речовини з покращеними фізико - механічними параметрами, необхідно розглянути, відповідні структурі, що сформувалася (раніше визначені), властивості.

4. Розшифрування фізичних, механічних і триботехнічних характеристик (міцність, твердість, пластичність, коефіцієнт тертя, корозійну стійкість і зносостійкість) поверхневого шару, що утворився, проводиться аналітично за результатами досліджень попередніх етапів з використанням довідкових даних [1]. Цей етап є особливо важливим, оскільки створення

матеріалів з покращеними властивостями для технічних транспортних засобів нового покоління є першочерговим завданням.

5. Математичний опис механізму утворення нового поверхневого шару.

6. Визначення геометричних характеристик нарощування відновлювального шару деталей та прогнозування його механічних властивостей.

Слід зазначити, що у наведеній вище схемі саме 5 та 6 пункти вимагають глибокого теоретичного опрацювання. Насамперед це стосується питань пов'язаних з можливістю проведення безрозбірної обробки поверхонь кінематичних пар тертя, а також прогнозуванням нарощування відновлювального шару з покращеними характеристиками.

Для практичної реалізації пункту 6 запропоновано використовувати умову повного відновлення геометрії поверхні найбільш зношених зонах. Найбільш принциповим і складним моментом є проведення якісної оцінки можливості нарощування значного шару металокераміки в найбільш зношених місцях працюючих деталей механізму з повним відновленням початкової геометрії деталей. І тому використовуються методи твердотільного аналізу.

Відомо, що термодинамічні процеси, що відбуваються в зонах тертя, є причиною рекристалізації, при підвищенні температури рухливість атомів зростає, процеси активізуються і при досягненні певної необхідної температури утворюються зародки нових зерен поверхневого шару металокераміки [6].

Крім того, що в процесі тертя підвищуються температури, при цьому на контактних поверхнях кінематичних пар тертя зростають локальні (місцеві) деформаційні напруги. Найбільші значення цих напруг відповідають найбільш деформованим, пошкодженим у процесі експлуатації областям робочих поверхонь, що накопичуються в зонах найбільшого зносу.

Для математичного опису процесів утворення шару в цих зонах (з максимальною кількістю деформацій) пропонується використовувати поняття градієнта цих напруг. Введення на розгляд поняття градієнта напруг дозволяє моделювати явище перенесення маси речовини-мастила [9, 10]. Слід також відзначити, що градієнт напруг, що виникає, має найбільші значення в областях з найбільш складною геометрією поверхні. При цьому основний приплив маси нового шару, що формується, спрямовується в бік збільшення градієнта напруг в області, де концентрація їх максимальна, тобто в області з найбільшою деформацією поверхні (в напрямку збільшення градієнта) [12, 16].

Таким чином, нарощування поверхневого шару відбувається по суті вибірково, а саме в найбільш пошкоджених місцях деталей механізму. Наслідком зазначеного є відновлення геометрії зношених поверхонь. Шар металокераміки, що утворюється, володіє високими показниками міцності і зносостійкості і є відновним для робочих поверхонь деталей, що в кінцевому підсумку призводить до виконання вимог працездатності, надійності та економічності.

Металокераміка має високі значення параметрів міцності і твердості, а також аномально малим коефіцієнтом тертя. Фізико-механічні властивості металокераміки наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості металокераміки [19].

Температура плавлення $T_{пл}, ^\circ C$	2050 - 3050
Густина, $г/см^3$	4 - 10
Межа міцності при $20 ^\circ C$ при розтягу, $кгс/мм^2$	10 – 26
Межа міцності при $20 ^\circ C$ при згинанні, $кгс/мм^2$	8 - 23
Межа міцності при $20 ^\circ C$ при стисканні, $кгс/мм^2$	80 - 300
Модуль пружності $E \times 10^{-2}, кгс/мм^2$	140 - 380
Твердість за Моосом	3,5 - 9
Коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha \times 10^6, C^{-1}$	8 - 15
Стійкість до окислення	середня
Стійкість до ерозії	Середня/висока
Стійкість до теплового удару	висока

Визначення швидкості наростання і глибини сформованого поверхневого шару нової речовини (металокераміки) навіть, при відомому фазовому складі та його структурі, є досить складним завданням.

Результати досліджень, проведені з використанням металофізичних методів [16-19], обґрунтовують припущення про припинення зростання шару при досягненні повної геометрії деталей механізму. За свідченнями авторів [13] експериментальні дослідження показали, що металокерамічний шар не обсіпається у процесі тривалої експлуатації. Взаємна дифузія металу та шару мастила призводить до утворення кристалічного рельєфу (шар нової структури) на глибину 10 – 30 мкм. Такі результати можуть бути підтверджені теоретично. Процес наростання поверхневого шару нової фази на металевих поверхнях діючих деталей механізму відбувається в умовах тертя, отже, при підвищених температурах. Нова фаза (шар металокераміки)

є при цьому продуктом взаємодії елементів речовини-мастила та металу (сталі). Таким чином, введення речовини-мастила на поверхні працюючого механізму в умовах тертя, по суті, є хіміко-термічною обробкою поверхні деталей. Хіміко-термічною обробкою є поверхневе насичення металу (сталі, чорного металу) відповідним елементом шляхом його дифузії в атомарному стані із зовнішньої фази при високій температурі [19].

1) виділення дифузного елемента в атомарному стані. Речовини-мастила при високих температурах виділяють (розпадаються) елементи в атомарному стані, які дифундують в кристалічну решітку металу;

2) контактування атомів дифузного елемента з поверхнею металевого виробу і проникнення (розчинення) їх у решітку заліза (абсорбція).

3) дифузія атомів насичуючого елемента в глиб металу, нарощування поверхневого шару.

Швидкість та глибина проникнення залежить від температури та тривалості насичення.

Відомо, що за наявності високих температур, що супроводжують процес тертя, утворення нової структури на поверхні контактуючих деталей відбувається досить швидко [19]. Однак глибину та момент повного формування шару нової структури можна визначити лише експериментальним шляхом. Тому доцільно проведення низки відповідних експериментів, вкладених у вирішення цієї проблеми. Наближена оцінка може бути виконана з використанням даних щодо швидкості нарощування поверхневого шару нової фази.

Описана методологія дозволяє вже зараз вирішувати завдання, пов'язані з математичним моделюванням та прогнозуванням процесів утворення матеріалів з покращеними механічними властивостями для відновлення зношених деталей. Особливої актуальності набуває націленість цих завдань на безрозбірні відновлювальні технології. Попередні

дослідження та розрахунки підтвердили доцільність таких досліджень для технічних засобів з метою відновлення неремонтопридатних деталей та складальних одиниць (зубчастих коліс, зірочок та ланцюгових передач, підшипників кочення та ін.).

РОЗДІЛ 3.МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ РОБОТИ

За результатами проведеного аналізу було б доречними створення методичних вказівок до проведення експериментальної (або лабораторної) роботи.

Склад роботи пропонується наступний:

- Тема – Способи відновлення деталей. Деталі, що визначають довговічність агрегату (їх відмова викликає потребу у його капітальному ремонті), називаються ресурсними. Їхня довговічність висока і за термін служби агрегату вони відновлюються один-два рази. Стан решти (недовговічних) деталей визначає безвідмовність агрегату. Є надія, що такі деталі можна відновити з використанням ремонтних технологій.

- Мета – Оцінка технічного стану деталей ремонтного фонду. Технічний стан деталей ремонтного фонду визначається зносами, деформаціями, втомними змінами та старінням матеріалу. Подальший аналіз виявляє причини досягнення деталей граничного стану. Цими причинами можуть бути «вузькі» місця у процесах виготовлення та відновлення деталей (недоліки конструкції, незадовільний вибір матеріалів, механічної та термічної обробки). Вірно встановлена причина та обраний шлях відновлення можуть надати оптимальні результати.

- Основні етапи – Розгляд та аналіз технічного стану деталей технічного засобу; обрання методу ремонту та/або відновлення; підбор матеріалів (базуючись на математичних моделях сформованих за результатами дипломної роботи)

- Висновки – Кількісні та якісні оцінки очікування за результатами запланованих маніпуляцій. На підставі відомостей, отриманих у роботі, встановлюють частку придатних деталей, що використовуються без

відновлювальних робіт, обсяги відновлення деталей та відповідні витрати праці, потребу у запасних частинах.

Подібна робота має певну доцільність для учнів та студентів загалом – інженерних та технічних спеціальностей.

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведений теоретичний та практичний аналіз проблем пошуку нових технологій створення матеріалів із завданими властивостями та подальшого використання їх в якості основи для безрозбірної ремонтно – відновлювальної технології.

1. Проаналізовано та систематизовано літературні дані з досліджень механічних та структурних властивості металів і сплавів, що можуть бути застосовані в роботі різноманітної спрямованості технічних засобів, особливо двигунів внутрішнього згорання.
2. Отримано універсальні практичні моделі для проведення ремонтно – відновлювальних технологій, в тому числі безрозбірних.
3. Запропоновані альтернативні підходи для використання унікальних речовин для створення матеріалів з покращеними механічними властивостями (твердість, міцність, пружність, довговічність)
4. Описана методологія, яка дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з математичним моделюванням та прогнозуванням процесів утворення матеріалів з покращеними механічними властивостями для відновлення зношених деталей.
5. Знайдено ефективні підходи до адаптації методів відновлювальних технологій в навчальний процес, а саме сплановані науково-методичні рекомендації для проведення експериментальної роботи.

Планується опублікування основних результатів роботи в матеріалах університетської науково – методичної конференції з публікацією тез.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Introduction to Internal Combustion Engines, Richard Stone, Publisher Red Globe Press, London, 1999, p. 641, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-14916-2>
2. Різновиди двигунів внутрішнього згоряння, И.И. Милаева, А.А. Волошин, Том 18, № 2 (2018): Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.
3. Транспортні енергетичні установки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя :НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 264 с.
4. Improvement of Mechanical Properties in Light Weight Mg-based Materials, A. Mallick, Procedia Engineering, V. 149, 2016, P. 283-287, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.668>
5. Improved mechanical properties of environmentally friendly jute fibre reinforced metal laminate sandwich composite through enhanced interface, E. Haq, A. Saifullah, A. Habib et. al., Heliyon, V. 10, Issue 2, 30 January 2024, e24345, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24345>
6. Improved mechanical properties of graphene-modified basalt fibre–epoxy composites, H. Sepetcioglu, L. Lapčík, B. Lapčíková et. al., Nanotechnology Reviews, V.13, Issue 1, <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0052>
7. Nunez - Regueiro M. Overview of superconductivity fullerene //in: Recent Adv. in the Chem. & Phys. of Fullerenes and Rel. Materials (eds.K.Kadish and R.Ruoff), The Electrochem.Soc., Inc., Pennington NJ. - 1995 - v.2.- P. 926 - 934.
8. Елецкий О.В., Смирнов Б. М. Фуллерени // УФН. - 1993.- Т. 163.- № 2.- С. 33 -61.
9. Axe J.D., Moss S.C. and Neumann D.A. Structure and dynamics of crystalline C₆₀ //Solid State Physics: Adv.in Res. and Applic., edited by Ehrenreich H. and Spaepen F., New York: Acad. Press. - 1994- v. 48.- P.149 -224.

10. Елецкий О.В., Смирнов Б.М. Фуллерени і структура вуглецю. // УФН - 1995.- V.165. - N 9. - С. 980 - 1009
11. Blank V., Popov V., Buga S. et al. Is C₆₀ fullerite harder than diamond? // Phys. Lett. A. - 1994.- V.188 - P. 281 -286.
12. Лубенец С. В., Нацик В.Д., Фоменко Л.С., Исакина А.П., Прохвятилов А.И., Стржемечный М.А., Аксенова Н.А Структура, системи ковзання та мікротвердість кристалів C₆₀ // ФНТ - 1997.- Т. 23. - № 3.- С. 338 - 351.
13. N.A.Aksenova, A.P.Isakina, A.I.Prokhvatilov, M.A.Strzhemechny and V.N.Varyukhin Thermodynamic properties of C₆₀: Effect of impurities // in:Recent Adv. in the Chem. & Phys. of Fullerenes and Rel. materials (eds.K.Kadish and R.Ruoff), The Electrochem. Soc., Pennington NJ.- 1994.- V. 1.- P.1543 - 1549.
14. Aksenova N. A., Isakina A.P, Prokhvatilov A.I., Strzhemechny M.A., Soldatov A.V. and Sundqvist B. Structure studies of C₆₀ polymerized at low Pressures // in: Recent Adv. in the Chem. & Phys. Fullerenes and Rel. Materials (eds. K.Kadish and R.Ruoff) The Electrochem. Soc., Inc., Pennington , NJ.- 1997.- P. 687-694.
15. Елецкий О. В. Вуглецеві нанотрубки // УФН.- 1997. - Т. 167. - № 9. -С. 945 - 972.
16. Repair and restoration of engineering components by laser directed energy deposition, A. Aprilia, N. Wu, W. Zhou, Materials Today: Proceedings, V. 70, 2022, P. 206-211
17. Конспект лекцій з дисципліни «Основи технології відновлення деталей» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за спеціальністю 131 - Прикладна механіка за освітньо-професійною програмою «Технологія та устаткування зварювання» /Укл. Гасило Ю.А. Кам'янське: ДДТУ, 2017, 147 с.
18. Технології одержання металів та сплавів для виробництва: Навч. посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За

ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. – 224 с.

19. Materials Science and Engineering: William D. Callister Jr., Textbooks, 1985, 848 pages.